

2020年1月29日

「博士学位請求論文」審査報告書

審査委員 (主査) 理工学部 専任教授

氏名 市 原 裕 之 (印)

(副査) 理工学部 専任教授

氏名 阿 部 直 人 (印)

(副査) 理工学部 専任教授

氏名 小 澤 隆 太 (印)

1 論文提出者 藤司 純一

2 論文題名 結合非負システムに基づくフォーメーション制御とモデル化誤差を考慮したクアドロータへの応用

(英文題) Formation Control Based on Interconnected Positive Systems and Its Application to Quadrotors With Model Uncertainty

3 論文の構成

本論文は、つぎの7章と付録から構成される。

第1章：序論

第2章：保存量による外乱抑制

第3章：結合非負システムに基づくフォーメーション制御

第4章：クアドロータへの応用

第5章：数値実験

第6章：実機実験

第7章：結論

4 論文の概要

単一の制御対象をエージェントとし、互いの情報を交換しながら全体の目的を達成する複数のエージェントから構成される分散型の制御システムを指して、近年のシステム制御分野ではマルチエージェントシステムと呼んでいる。本論文ではまず、マルチエージェントシステムとしての合意制御システムやアドミッシブル性を備える結合非負システムが状態変数から構成される保存

量を有し、外乱のもとで保存量が変化することに着目し、定数外乱フィードバックによってその影響を低減できることを解析的に示している。合意制御とは、複数のエージェントのそれぞれの状態変数がそれらの初期状態に依存するある1つのベクトルに収束する制御のことをいう。また、アドミッシブル性のもとで、結合システムは適切(well-posed)かつ非負になることが保証される。そのような結合非負システムは、むだ時間等の摂動に対してロバストであることが知られている。つぎに、各エージェントの入出力信号が適当なフィードバックによって非干渉化できないという意味で本質的に多入出力システムであるとき、アドミッシブル性を備える結合非負システムがさらにパーシステンス性を備えるために、各エージェントと結合行列が満たすべき条件を解析的に明らかにしている。パーシステンス性とは、非零の初期状態に対して状態変数が非零のベクトルに収束する性質である。さらに、クアッドロータを非負システムによるエージェントとして取り扱うための非干渉化フィードバック手法、モデル化誤差を考慮した非線形内部モデル制御の構成法をそれぞれ提案している。以上から、外乱を受ける複数のクアッドロータに限られた通信構造によって互いの位置や姿勢に関する情報を交換しながら自律的に所望の配置に収束することを明らかにしている。非負値のベクトルによって配置を与えたとき、クアッドロータは3次元空間の非負領域のみで移動し、このベクトルの定数倍に収束するという結合非負システムの性質を有している。最後に、得られた解析条件や非干渉化フィードバック手法等を数値的に、それらを統合した複数のクアッドロータによるフォーメーション制御を実機によってそれぞれ実験し、提案手法の有効性を確認している。

第1章では、近年実用化が進む無人ビークルの役割と課題を述べ、とくに複数の無人飛行体による交通システム等のためにシステム制御分野で議論されているマルチエージェントシステムに対する制御手法が有効であることを述べている。エージェント間の通信構造を取り扱うためのグラフ理論及びグラフに対応する実行列の固有値解析に基づいて、複数のエージェントが互いの位置や姿勢に関する情報を限られた通信構造の中で交換しながら、コンセンサスを得るための合意制御の有用性について述べている。マルチエージェントシステムに対する制御手法では、各エージェントを同一の特性をもつ積分器としてモデル化する合意制御システムに対して、各エージェントを同一とは限らない非負システムとするマルチエージェントシステム、つまり、結合非負システムの枠組みが物理的な制約等のある制御に役立つ可能性を示唆している。実際、積分器、1次遅れ系、2次遅れ系など多くの基本的かつ実用的な動的システムは非負システムである。結合非負システムにおいて、エージェントは位置や姿勢に関する情報を単純に交換するだけではなく、最終的に達成したい配置のフォーメーションに関する情報を用いて情報交換の強さを調整している。

第2章では、合意制御システムや結合非負システムに現れるシステムの保存量について議論し、保存量を利用した外乱抑制手法を述べている。外乱等がないシステムに対しては初期状態によって保存量が一意に定まるため、実システムの状態変数から構成した非保存量との差を観測することで外乱を検出することが可能となる。さらに、これをフィードバックすることで外乱を抑制することを述べている。ここでは、結合非負システムに対する外乱フィードバックの構成条件を必要十分の意味で明らかにしている。つまり、保存量と非保存量の単純な差に正のゲインを乗じて負帰還でフィードバックした場合に、閉ループ系の代表極のみが複素平面上を左向きに移動することを階数1更新行列(rank-one updated matrix)の性質を用いて解析的に明らかにして

いる。閉ループ系の代表極は、原点から閉ループ系の2番目に大きな実部をもつ固有値の実部までの範囲で実軸上を移動するように設計することができる。これによって、外乱に対する制御性能を調整することが可能となる。

第3章では、結合非負システムの理論の拡張を行っている。従来、各エージェントは単入出力システムとしていた。ここでは、本質的に非干渉化できない多入出力システムを1つのエージェントとしている。このとき、結合非負システムがパーシステンス性を備えるためにエージェントが満たすべき動特性と通信構造を表わす結合行列に対する十分条件を明らかにしている。そのために、ブロック成分ごとの演算がクロネッカ積となるような2つの行列の演算を新たに定義し、それぞれの行列が既約であるときに、その演算によって得られた行列も既約となるための条件がそれぞれの既約行列の周期の最大公約数に依存することを明らかにしている。この演算を用いることで、各エージェントの入出力数が同じ場合に、エージェントの入出力チャンネルごとの可制御性及び可観測性、定常ゲイン行列の可逆性、結合行列の既約性などの仮定のもとで、アドミッシブル性を有する結合非負システムがパーシステンス性を備え、ある凸錐領域に含まれる初期状態に対して状態変数とその凸錐領域のみで移動し収束することを明らかにしている。

第4章では、非線形かつ多入出力システムであるクアドロータを単一のエージェントとし、結合非負システムの理論を用いてフォーメーション制御を行うため、クアドロータの上部に設けた仮想の固定点に関する動特性を非干渉化するフィードバック手法を与えている。このフィードバックは非干渉化と同時に線形化も行っている。これによって、オイラー角表現された動特性を線形の非負システムと見なすことが可能になることを述べている。ただし、クアドロータが特異な姿勢をとる場合には線形化フィードバックの実装が難しくなる。この欠点を回避するために、クアドロータの動特性を二重四元数表現し、固定点を必要としない線形化フィードバック手法が適用できることも述べている。これらの線形化フィードバック手法は、モデル化誤差に対して脆弱である。そのため、モデル化誤差に対処できるように多入出力系に対する非線形内部モデル制御を構成し、それをクアドロータに適用することで、線形の非負システムとして表わすことができることを示している。単入出力系に対する非線形内部モデル制御を多入出力系に拡張することによって、第3章までに述べてきた基礎理論を適用するための準備を整えている。

第5章では、ここまでに述べた基礎理論や実装手法を数値実験で検証している。まず、外乱フィードバックを施した結合非負システムが各エージェントに加わる外乱を低減することを閉ループ系の時間応答及び極配置で確認している。提案する外乱フィードバックは、閉ループ系の固有値のうち、代表極のみを移動できるという特異な性質があるため、閉ループ系の2番目に大きな実部をもつ固有値まで過渡特性を改善できることを確認している。続いて、多入出力システムに対する結合非負システムについては、本質的に単入出力システムとして非干渉化できないシステムに対して、提案した条件を満たすエージェントと結合行列を用いることで、パーシステンス性を有する結合非負システムとなることを時間応答で確認している。さらに続いて、クアドロータモデルに対してモデル化誤差を考慮した線形化フィードバック手法を適用し、いくつかの物理定数が設計段階において異なる場合においても安定飛行が可能であることを確認している。最後に、線形化フィードバック手法を適用したクアドロータを1つの非負システムのエージェントとし、複数のクアドロータによるフォーメーションが達成できることを時間応答から得た軌道で確認している。同時に、外乱フィードバックが有効に機能することを確認している。

第6章では、複数の小型クアドロータが互いに通信しながら自律的に3次元空間上で指定したフォーメーション配置に収束する様子を実機実験によって確認している。複数のクアドロータが狭い範囲で動作し、互いの風圧を外乱として受ける場合においても、外乱フィードバックが有効に働くことを確認している。

第7章では、結論を述べており、今後の課題として、線形化フィードバック手法で補償できるモデル化誤差を詳細に解析することなど挙げている。

付録では、主要結果の証明とその証明に必要な補題等を述べている。

5 論文の特質

本論文は、通信によって繋がった複数の動的システムの分散的な制御に関する研究である。近年システム制御分野で議論されている分散制御の研究目的の1つは、通信に制約を設けエージェント数が増えても現実的な運用が可能となる大規模なマルチエージェントシステムの制御理論の整備にある。その観点から、本論文で取り扱っている結合非負システムは、目的のフォーメーション配置と与えられたスパースな通信構造に対してエージェントを通信で結ぶための結合行列を設計できる点で優れている。このような分散制御において、具体的な機械システムを想定し、外乱の対処方法を提案し、実装まで意識して制御系の構成手法を系統的にまとめた研究は多くはない。また、非負システムは、人口動態、捕食モデル、生体に関するコンパートメントモデルなど状態変数が負になり得ない動的システムを表現し、その変化を予測するために使われてきた。本論文のように、非負システムを動的な機械システムと見なし分散制御を適用する発想は他の研究には見られない。近い将来、移動体同士が通信によって繋がる大規模な交通システム等に対して、本論文で明らかにされた内容は、その持続的かつ安全な運用を保証するための理論的な裏付けを与えることになるかと期待できる。

6 論文の評価

本論文は、外乱フィードバックによって結合非負システムへの影響を低減できること、及び本質的に多入出力システムであるエージェントから構成される結合非負システムがパーシステンス性を備えるために、非負システムである個々のエージェントと結合行列が備えるべき条件をグラフ理論と対応する行列理論を用いてそれぞれ解析的に明らかにしており、システム制御の観点からその学術的意義は深い。また、モデル化誤差を考慮したクアドロータに対する非干渉化フィードバック手法を提案し実機で検証しており、その工学的な価値は高い。

7 論文の判定

本学位請求論文は、理工学研究科において必要な研究指導を受けたうえ提出されたものであり、本学学位規程の手続きに従い、審査委員全員による所定の審査及び最終試験に合格したので、博士（工学）の学位を授与するに値するものと判定する。

以 上